

DOI: 10.3901/JME.2019.15.056

基于电场驱动喷射沉积微尺度 3D 打印制造金属网栅透明电磁屏蔽玻璃的研究*

周贺飞 兰红波 李红珂 许 权 赵佳伟 张广明
(青岛理工大学山东省增材制造工程技术研究中心 青岛 266520)

摘要: 为了解决大尺寸金属网栅透明电磁屏蔽玻璃高效和低成本制造的难题,提出一种基于电场驱动喷射沉积微尺度 3D 打印制造金属网栅透明电磁屏蔽玻璃的新方法。通过试验揭示了打印速度对金属网栅(线宽和形貌)的影响及其规律,打印金属网栅的线宽和周期对于透过率和电磁屏蔽效能的影响和规律。利用提出的方法,并结合优化的工艺参数,完成了三个典型工程案例的制造,使用高银含量(质量分数为 80%)的纳米银浆(黏度高达 20 000 mPa·s),制作金属网栅的面积为 100 mm×100 mm,线宽是 20 μm,烧结后金属网栅与玻璃基底的附着力为 4 B。其中,金属网栅周期为 500 μm 时,可见光透过率为 88%,对常用中高频电磁波屏蔽效能大于 26 dB;金属网栅周期为 300 μm 时,可见光透过率为 83%,对常用中高频电磁波屏蔽效能大于 30 dB;金属网栅周期为 150 μm 时,可见光透过率为 67%,对常用中高频电磁波屏蔽效能大于 37 dB。结果表明,结合电场驱动喷射沉积微尺度 3D 打印和高银含量高黏度纳米银浆,为大尺寸高性能透明电磁屏蔽玻璃的批量化制造提供了一种具有工业化应用前景的全新解决方案。

关键词: 金属网栅;透明电磁屏蔽;微尺度 3D 打印;透过率;屏蔽效能

中图分类号: TG156

Metal-mesh Transparent EMI Shielding Glass Fabricated by Electric-field-driven Jet Deposition Micro-scale 3D Printing

ZHOU Hefei LAN Hongbo LI Hongke XU Quan ZHAO Jiawei ZHANG Guangming
(Shandong Engineering Research Center for Additive Manufacturing,
Qingdao University of Technology, Qingdao 266520)

Abstract: In order to implement the mass production of the large-area metal-mesh based transparent electromagnetic interference (EMI) shielding glass at low-cost and high throughput, a novel manufacturing method combining the electric-field-driven jet deposition micro-scale 3D printing and the nanosilver paste with a high silver content (80 wt.%) and high viscosity (up to 20000 mPa.s) is proposed. The influence of printing speed on the line width of metal-mesh, and the effects of the line width and the pitch of the printed metal-meshes on the optical transmittance and the electromagnetic shielding efficiency are revealed by a serial of experiments. Moreover, based on the proposed method and the optimized process parameters, three typical cases of the metal-mesh transparent EMI shielding glasses with area of 100 mm × 100 mm and line width of 20 μm are fabricated. In addition, the adhesive force between the metal-meshes and the glass substrate are measured as 4B after sintering. The experimental results demonstrated, when the pitch of metal-meshes is 500 μm, the optical transmittance is 88% and the EMI shielding efficiency for the common medium-high frequency electromagnetic wave is greater than 26 dB; when the pitch of metal-meshes is 300 μm, the optical transmittance is 83% and the shielding efficiency for common medium-high frequency electromagnetic wave is higher than 30 dB; when the pitch of metal grids is 150 μm, the optical transmittance is 67% and the shielding efficiency for common medium-high frequency electromagnetic wave is higher than 37 dB. As a result, the proposed method based on the electric-field-driven jet deposition micro-scale 3D printing with the high content nanosilver paste provides a promising solution for mass producing large-area and high-performance metal mesh transparent EMI shielding glasses at low cost.

Key words: metal-mesh; transparent EMI shielding; micro-scale 3D printing; optical transmittance; shielding efficiency

* 国家自然科学基金(51775288,51805287)和山东省重点研发计划(2018GGX103022)资助项目。20190114 收到初稿,20190428 收到修改稿

0 前言

随着无线通信、手机、各种移动设备的广泛应用,电磁辐射已经与大气污染、水质污染、噪音污染并称为世界四大污染。尤其是在航空航天、国防军事、医疗设备、精密电子、通信、显示等诸多领域对于电磁屏蔽(尤其是透明电磁屏蔽)提出越来越高的要求^[1-2]。例如飞行器的光学窗一方面需要具有高的电磁屏蔽效能,以实现抗电磁干扰、电磁隔离和缩减雷达特征信号等功能,而且随着空间电磁环境的复杂化,雷达探测技术的不断进步,光学窗的电磁屏蔽还必须是强电磁屏蔽;另一方面,随着光电探测器件灵敏度和最小分辨能力的不断提高,为实现更远距离和更微小目标的光学探测和观测,光学窗的电磁屏蔽还应不影响其光学透过性,即光学窗还必须具有高的透过率和低的成像质量影响^[3-4]。因此,理想的光学窗应同时具有强电磁屏蔽和高光透过率。但是,高的红外透过率和强的屏蔽效率是一对矛盾,难以同时满足。因此,开发同时具有高透过率和强电磁屏蔽效能的光学窗,尤其是能实现其高效和低成本规模化制造技术已经成为当前透明电磁屏蔽领域一项挑战性难题,也是亟待突破的问题^[5-6]。

目前实现透明电磁屏蔽的技术主要包括:透明导电薄膜、电控灵敏窗口材料、频率选择表面技术、金属网栅(网格)等^[7-9]。已有的研究结果显示,与其它技术相比,金属网栅能够有效解决高红外透过率与强屏蔽效率的矛盾,实现高性能透明电磁屏蔽,显示出广泛的工程化应用前景。金属网栅是在透明基底(基板、基材、衬底)上制作出具有周期、线宽等结构参数可变的导电网栅状微细结构,其结构参数可以根据使用环境和性能要求进行设置和定制,以满足不同的透过率和电磁屏蔽效能实际需求^[10]。由于金属网栅的周期远小于电磁波长,使它具有电磁屏蔽的功能;而金属网栅的周期远大于近红外/可见光波长,它对光学性能影响较小,可实现在屏蔽电磁波的同时不会过大的影响透光性。此外,金属网栅结构参数和材料具有多样性、良好的透光与电磁屏蔽特性、根据实际需要灵活设计和定制的优点^[11-12]。因而,它已经成为最理想的透明电磁屏蔽技术解决方案之一。

基于金属网栅透明电磁屏蔽玻璃网栅的线宽和周期都在微尺度,而且还需要在非平整基材实现大面积网栅微结构的制造。目前已经提出用于制造透明电磁屏蔽金属网栅的微细加工技术有多种,诸如

光学光刻、激光直写、纳米压印、喷墨打印、气溶胶打印、转印、丝网印刷、电流体动力喷射打印等。但是现有的这些技术都还存在一定的局限性和不足。例如,传统光刻技术存在制造工艺复杂、周期长、材料浪费严重、生产成本低,尤其是难以实现大面积金属网栅的制造,而且对基材的平整度要求也非常高。纳米压印同样存在生产成本低、周期长,尤其是还面临难以实现大尺寸无拼接微模具制造的难题。激光直写工艺同样存在成本高,工艺复杂,材料浪费严重的问题,喷墨打印^[13]存在分辨率低(线宽一般大于20 μm),而且打印材料黏度受限(黏度通常被限定在30 mPa·s以下)。电流体动力喷射打印技术尽管有很高的精度,但是对于玻璃绝缘衬底,打印导电材料,由于存在残留电荷,容易出现短路和放电的现象,无法实现稳定的打印^[14-15]。此外,现有的技术还都存在所制造的金属网栅电磁屏蔽效能较低(方阻大)的问题。因此,在非平整的玻璃基材上实现大面积金属网栅高效低成本制造是影响和制约金属网栅透明电磁屏蔽玻璃广泛工业化应用最大的瓶颈和挑战性难题。

结合微尺度增材制造工艺和高性能纳米银浆的优势,本文创新性提出一种基于电场驱动喷射沉积3D打印制造大尺寸高性能金属网栅透明电磁屏蔽玻璃新方法,它能够实现大面积透明电磁屏蔽玻璃的高效和低成本批量化的制造,尤其是所制造的透明电磁屏蔽玻璃能同时具有可见光高透过率和强电磁屏蔽效能,解决了可见光高透过率和强屏蔽效率的矛盾。为探索高性能大面积透明电磁屏蔽玻璃的批量化制造提供了一种全新的解决方案。

1 基于电场驱动喷射沉积微尺度3D打印透明电磁屏蔽玻璃制造方法

基于电场驱动喷射沉积微尺度3D打印金属网栅透明电磁屏蔽玻璃的制造工艺主要包括:网栅设计和优化;透明基材预处理和准备纳米银浆打印材料;网栅打印;网栅导电化处理(烧结)。如图1所述。

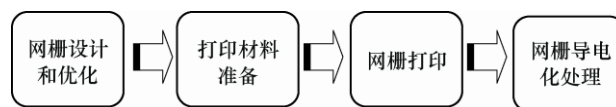


图1 基于电场驱动喷射沉积微尺度3D打印金属网栅透明电磁屏蔽玻璃制造工艺

具体工艺流程叙述如下。

(1) 网栅设计和优化。根据实际使用所要求的

电磁屏蔽效能和透过率等的技术指标, 确定和优化出金属网栅类型、线宽和周期, 生成金属网栅打印文件。

(2) 打印材料准备。包括透明基材预处理和纳米银浆打印材料准备, 采用超声波等工艺清洗基材(玻璃)表面的油污, 并置于干燥箱进行烘干; 综合考虑黏度、表面张力、含银量、与基材黏附力、烧结温度等工艺参数, 确定纳米导电银浆打印材料。

(3) 网栅打印。将打印文件输入到电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印机, 设置打印工艺参数, 使用确定的纳米银浆打印材料, 在基材上打印出银网格。根据实际性能要求, 可以使用多层打印工艺, 制造出大高宽比网栅结构。

(4) 网栅导电化处理(烧结)。将打印完成的网栅和基材从 3D 打印机打印床上取下, 放入真空加热炉中(或者采用激光烧结、光子烧结等), 根据纳米银浆的烧结工艺参数(加热温度和时间), 设置加热温度和保温时间, 实现打印后的金属网栅导电化处理。

电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印工艺是金属网栅制造关键技术。电场驱动喷射沉积 3D 打印是一种微纳尺度 3D 打印新工艺, 它基于自激发静电场, 利用电流体动力喷射和电荷诱导自对正, 并结合脉冲锥射流和连续锥射流两种打印工作模式, 实现大面积微结构高效低成本制造。而且它在多材料多尺度 3D 打印、宏/微跨尺度 3D 打印方面还具有独特的优势。本文使用的电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印的成形原理如图 2 所述。

电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印不但能实现大面积微结构的高效低成本制造, 而且还能实现超高黏度材料的打印($60\,000\text{ mPa}\cdot\text{s}$), 尤其是能够实现在绝缘玻璃衬底上导电材料稳定打印(克服了传统电喷打印该类材料易出现短路和放电现象)。因

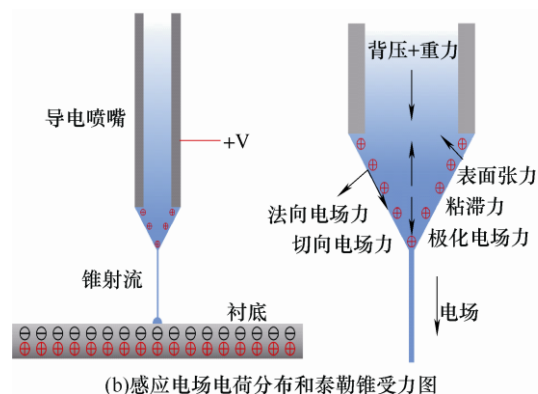


图 2 电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印基本原理示意图

此, 结合电场驱动喷射沉积微尺度 3D 打印和高银含量纳米银浆(避免或者减小了传统喷墨打印存在的咖啡环问题, 尤其是其打印的导电电路具有非常低的电阻), 为大面积高性能金属网栅透明电磁屏蔽玻璃的制造提供了一种较为理想的解决方案。此外, 作为一种单步直接图形化金属网格的方法, 它还具有生产成本低、材料利用率高、大面积高分辨图形化的突出优势。

2 试验装置和材料

2.1 试验装置

金属网栅打印采用课题组自主研发的电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印机, 最大成形尺寸 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 50\text{ mm}$, 运动平台采用高精度直线电机, 定位精度 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$, 重复定位精度 $1\text{ }\mu\text{m}$, 并带有视觉观测模块、真空加热吸附平台、自动供料模块等, 搭配自主研发的电场驱动高分辨率打印喷头。图 3a 是本试验所使用的电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印机。图 3b 是金属网栅低温烧结时使用的真空加热炉。

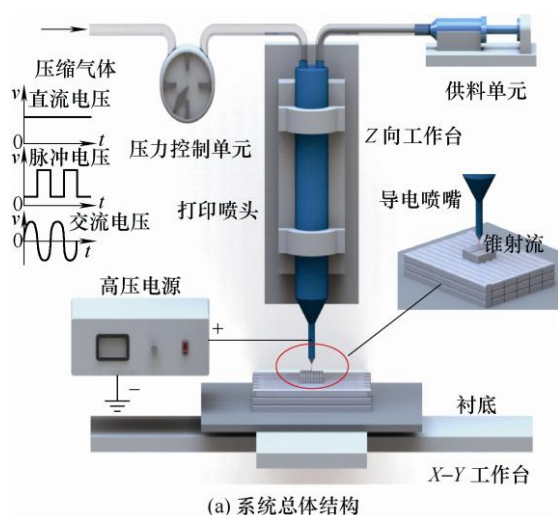


图 3 打印金属网栅的电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印机和真空加热炉

2.2 打印材料

试验打印喷嘴采用内径 $160\text{ }\mu\text{m}$ 的不锈钢针头, 基材使用浮法电子玻璃, 其尺寸 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,

厚度 1.1 mm。

打印材料是一种高黏度、高银含量纳米银浆，主要物理性能参数如表 1 所示。

表 1 打印材料纳米银浆的性能参数

性能	参数
黏度/(mPa·s)	≥20 000 (25℃)
银的质量分数(%)	≥80
密度/(g/cm ³)	2.9
纳米银的粒径/nm	200~300
电阻率/(mΩ·μm)	200
附着力/B	4 (150℃烧结 60 min, 3M 百格胶带测试法)

3 试验结果与讨论

3.1 打印试验样品

使用上述试验装置和材料，打印多组不同周期和线宽的金属网栅试验样品，并置于烧结炉中 150℃低温烧结 60 min，完成金属网栅的烧结导电化处理。根据测量和表征的结果，揭示打印金属网栅的线宽和周期对于透过率和电磁屏蔽效能的影响和规律。图 4 展示了其中一个金属网栅样品，线宽 25 μm，周期 400 μm，烧结后的银含量和网栅的三维结构图。金属网栅线宽、线边缘粗糙度、所有网栅一致性、银含量和分布都展示出较为理想的打印结果。利用 3M 百格胶带测试法测试金属网栅与玻璃基底的附着力，根据 3M 百格胶带测试标准，所制造的金属网栅结构与玻璃基底附着力等级达到 4B。

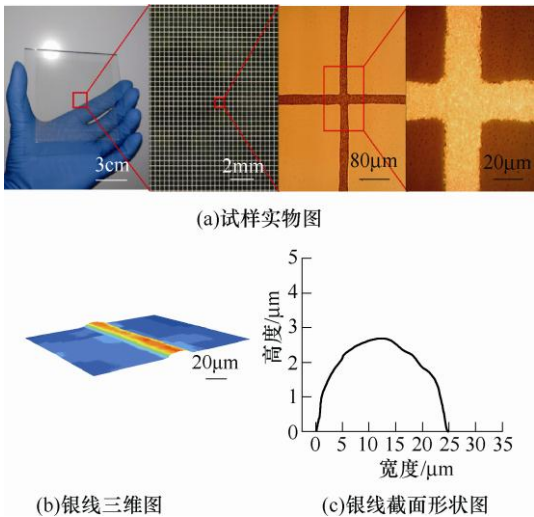


图 4 打印的金属网栅试样

3.2 线宽

线宽和周期是影响金属网栅透明电磁屏蔽玻璃性能(透过率和电磁屏蔽效能)的最重要的工艺参

数。理论上，金属网栅线宽越小，其光透过率就越高。但是，过小的线宽一方面导致方阻增大(电磁屏蔽效能低)，另一方面与基材的黏附性也变差。因此，实际打印时线宽需要根据具体要求优化出适合的线宽参数。周期对于金属网栅性能的影响与线宽类似，理论上采用较大的周期(随着周期的增大)，透过率增大，但电磁屏蔽效能会降低。反之，减小周期，电磁屏蔽效能提高，透过率却降低。通过试验揭示出线宽、周期等参数对电磁屏蔽窗的透过率和电磁屏蔽效能的影响规律，为金属网栅的设计和优化，以及实际打印奠定理论基础。

打印工艺参数设置如下：喷嘴内径为 160 μm，电压为 1 000 V、气压为 150 kPa、喷嘴与玻璃基材的高度为 0.3 mm。图 5 展示了纳米银浆打印过程中泰勒锥、锥射流和银线的形成及演化过程。其中图 5a 是在背压作用下将喷嘴中的纳米银浆挤压到喷嘴尖端处，并形成弯液面；图 5b 是施加 1 000 V 电压，弯液面被拉伸变形；图 5c 随着电压增大，弯液面最后被拉伸成泰勒锥；图 5d 在泰勒锥尖端形成稳定和持续的锥射流；图 5e 结合工作台移动，打印出高分辨的线栅结构。

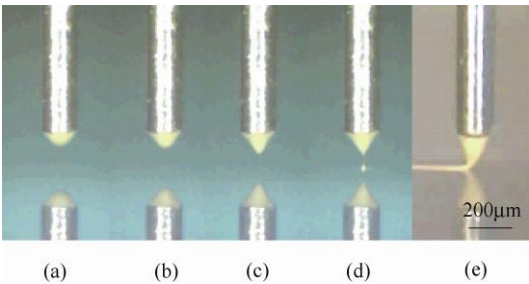


图 5 纳米银浆打印过程中泰勒锥、锥射流和银线的形成及演化

使用高黏度和高银含量的纳米银浆打印材料，采用较大的喷嘴(减少喷嘴堵塞)，电场驱动喷射沉积 3D 打印能实现高分辨率微尺度图案的制造，其主要成形机理：一个是通过锥射流喷射的“缩径效应”，另外一个为打印工作台对于锥射流的拖拽拉伸作用进一步减小打印线宽。图 6 从左到右依次为工作台移动速度是 40 mm/s，60 mm/s，80 mm/s，100 mm/s，120 mm/s，140 mm/s，160 mm/s 时所对应打印的线宽。根据打印结果，当速度为 40 mm/s，60 mm/s，80 mm/s，100 mm/s 时，线宽与形貌(线边缘粗糙度)较为理想；当速度达到 120 mm/s 时，线边缘粗糙度(平滑度)开始变差；当速度由 140 mm/s 增加到 160 mm/s 时，线宽能进一步减小到 10 μm 以下，但其几何形貌相对较差(线边缘粗糙度变差，平滑度变差导致导电性变差)。

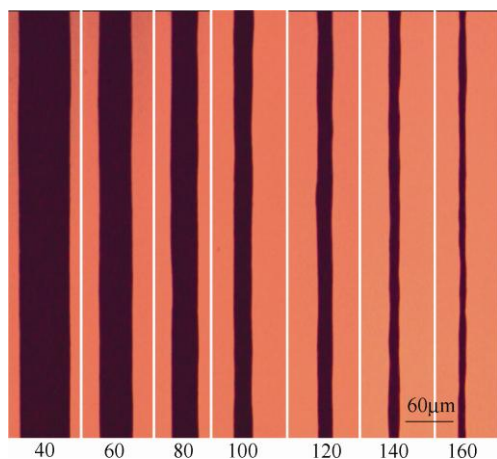


图6 不同打印速度对应网栅的线宽和形貌

(速度单位: mm/s)

根据试验的结果,图7是建立的打印速度与线宽的关系。由结果可知,随着打印速度的增大,金属网栅线宽逐渐减小,但是减小幅度的确越来越小。其原因是当打印速度逐渐增大时,高黏度的银浆射流受到拖拽力作用而迅速减小,当速度高于120 mm/s时,拖拽力几乎达到了银浆表面张力的极限,继续增大打印速度会使打印的网栅线边缘粗糙度变差,当打印速度超过临界阈值,无法实现连续的打印。因此,当打印速度为100~120 mm/s、线宽是18~22 μm时,网栅线同时具有较小线宽和相对均匀一致的形貌和平滑度。

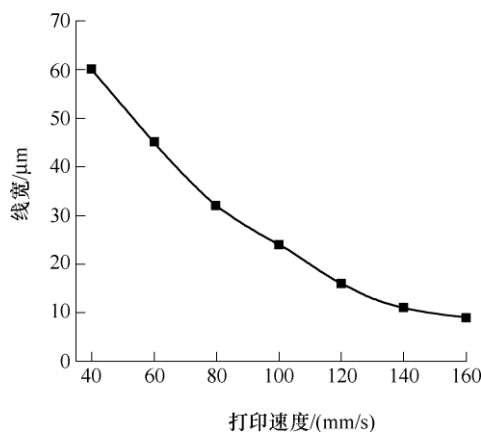


图7 打印速度与打印线宽的关系

3.3 透过率

透过率是评价金属网栅透明电磁屏蔽玻璃最重要的两个技术指标之一。金属网栅保持周期不变(500 μm),图8展示了线宽对于透过率的影响和规律。试验结果显示:可见光透过率随着线宽的增加而减小,当线宽小于30 μm时,金属网栅的透过率超过87%。

当金属网栅的线宽保持不变(线宽20 μm),金属网栅周期对透过率的影响和规律如图9所示。试验

结果显示:周期100 μm,透过率62%;周期150 μm,透过率67%;周期200 μm,透过率74%;周期300 μm,透过率83%;周期400 μm,透过率86%;周期500 μm,透过率可达88%。随着金属网栅周期的增大,透过率逐渐增大,当周期超过300 μm,透过率超过83%,具有较好的透过性能,基本能满足大多数实际工程应用的需求。

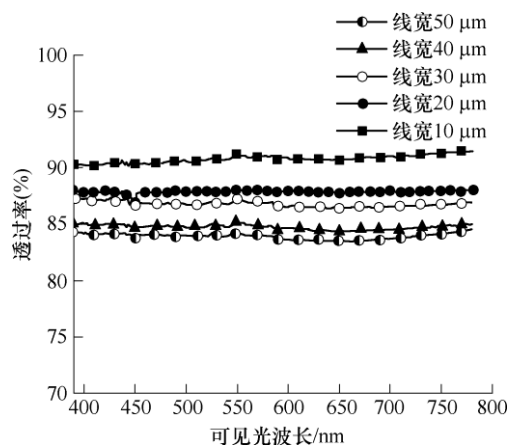


图8 同周期不同线宽网栅的透过率

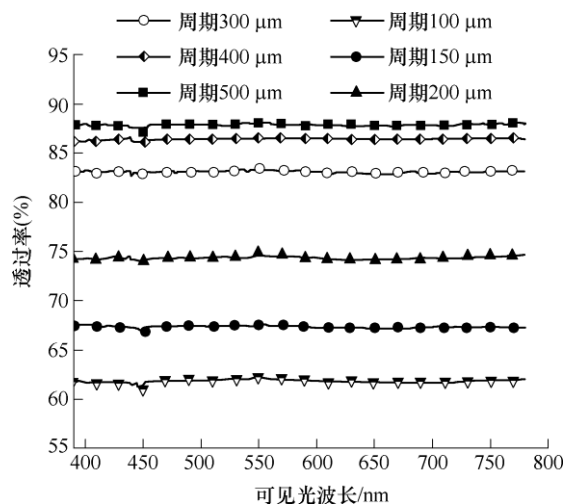


图9 同线宽不同周期网栅的透过率

因此,金属网栅的线宽和周期都能影响透明电磁屏蔽玻璃的透过率,当金属网栅周期保持500 μm不变,线宽从50 μm减小至10 μm时,可见光透过率从84%提高至90%以上;当金属网栅线宽保持20 μm不变,周期从100 μm增加至500 μm时,可见光透过率从62%提高至88%。

3.4 方阻和电磁屏蔽效能

方阻是反映金属网栅导电性的重要技术指标,同时也是影响金属网栅电磁屏蔽效能最重要的因素之一。金属网栅的周期和线宽对方阻都有影响。本文采取控制变量法研究周期和线宽对金属网栅方阻的影响及其规律。

当周期相同(500 μm),方阻随着线宽的变化及

其规律如图10所示。由图10可知,金属网栅的线宽和方阻是负相关,方阻随着线宽的增加而减小;当线宽小于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 时,方阻减小的趋势迅速变缓。结合透过率的研究结果(图8),线宽在 $20\text{ }\mu\text{m}$ 既具有良好透过率,又具有相对较低的方阻。

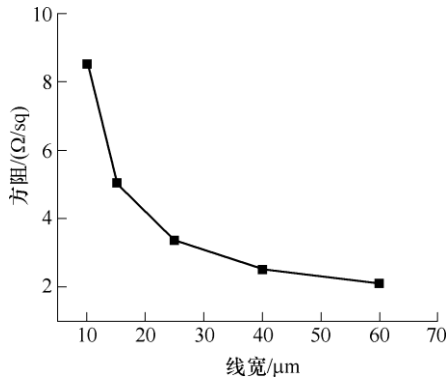


图10 周期不变,线宽和方阻的关系及其变化规律

线宽保持 $20\text{ }\mu\text{m}$ 不变,不同周期对于方阻的影响及其规律如图11所示。根据图11可知,当线宽保持 $20\text{ }\mu\text{m}$ 不变,金属网栅的周期和方阻是正相关,方阻随着周期的增大而增大,大致呈直线增加趋势。随着周期的增大,虽然金属网栅的透过率增大,但其导电能力接近直线下降,表示电磁屏蔽效能下降。因此,为满足具体的要求,还需进一步测定线宽为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 左右时不同周期金属网栅的电磁屏蔽效能,进而根据实际要求技术指标,确定出最适合的周期。

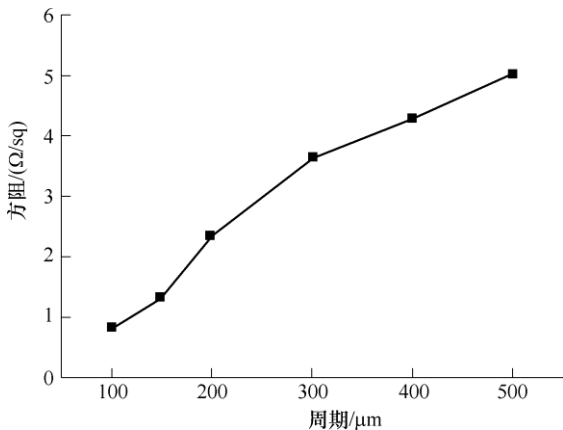


图11 线宽不变,周期和方阻的关系及其变化规律

金属网栅电磁屏蔽玻璃的透过率和屏蔽效能是一对矛盾体。金属网栅周期越小,线宽越大,屏蔽效能越高,但是透过率也越低。反之,金属网栅的周期越大,线宽越小,透过率则越高,但是屏蔽效能较低。实际应用时,需要根据具体要求确定和优化出合适的线宽与周期,才能同时满足透过率和电磁屏蔽效能两个技术指标。

根据透过率和方阻试验结果,可以发现,线宽在 $20\text{ }\mu\text{m}$ 左右时,金属网栅线的形貌平滑且均匀一

致,方阻相对较小,且透过率相对较高。在此基础上,如果选择合适的周期,则既能实现较高的透过率,又能得到较高的电磁屏蔽效能。因此,选取线宽 $20\text{ }\mu\text{m}$,测定不同周期的金属网栅(周期分别为 $150\text{ }\mu\text{m}$ 、 $300\text{ }\mu\text{m}$ 、 $500\text{ }\mu\text{m}$)的电磁屏蔽效能。测试仪器使用DR-S01法兰同轴屏蔽效能测试装置,测试结果如图12,并结合图9可知,保持线宽 $20\text{ }\mu\text{m}$,金属网栅周期为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 时,可见光透过率能达到88%,对常用中高频电磁波屏蔽效能大于26dB;金属网栅周期为 $300\text{ }\mu\text{m}$ 时,可见光透过率为83%,对常用中高频电磁波屏蔽效能大于30dB;金属网栅周期为 $150\text{ }\mu\text{m}$ 时,可见光透过率为67%,对常用中高频电磁波屏蔽效能大于37dB。因此,保持线宽 $20\text{ }\mu\text{m}$ 不变,电磁屏蔽效能随着金属网栅周期的减小而增大。对于电磁屏蔽效能要求较高的领域,可选择周期较小(如 $150\text{ }\mu\text{m}$)的金属网栅;但对于透过率要求较高的应用,可选择周期较大(如 $500\text{ }\mu\text{m}$)的金属网栅,对于电磁屏蔽效能和透过率需要同时兼顾的领域,选择 $300\text{ }\mu\text{m}$ 的周期。

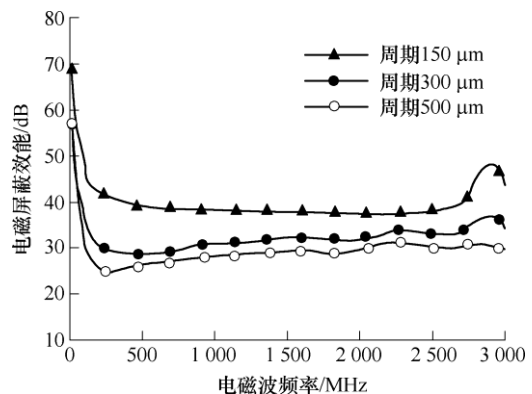


图12 不同周期电磁屏蔽窗屏蔽效能

4 典型案例

根据试验优化的结果,并结合不同应用需求的场景,使用高银含量纳米银浆(质量分数为80%),制作的三个金属网栅透明电磁屏蔽玻璃样件如图13所示。其中,图13a为大面积、高透过率电磁屏蔽玻璃样件,金属网栅的面积 $180\text{ mm}\times 180\text{ mm}$,线宽是 $20\text{ }\mu\text{m}$,周期是 $500\text{ }\mu\text{m}$,方阻约为 $4.93\text{ }\Omega/\text{sq}$,在电磁屏蔽效能达到26dB以上的同时,其可见光透过率达到88%,这一特征的金属网栅,可用来制作对透过率要求极高(透过率85%以上)的透明电磁屏蔽展柜;图13b是同时兼顾透过率和电磁屏蔽效能的样件,金属网栅的面积是 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,线宽是 $20\text{ }\mu\text{m}$,周期是 $300\text{ }\mu\text{m}$,方阻约为 $3.64\text{ }\Omega/\text{sq}$,其可见光透过率达到83%,电磁屏蔽效能达到30dB

以上,这一特征的金属网栅,可用于对透过率和电磁屏蔽效能均有较高要求(透过率 80%以上,电磁屏蔽效能 30 dB 左右)的具有电磁屏蔽功能的等离子电视显示屏、保密室玻璃门窗等;图 13c 为高电磁屏蔽效能的电磁屏蔽玻璃样件,金属网栅的面积是 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,线宽是 $20\text{ }\mu\text{m}$,周期是 $150\text{ }\mu\text{m}$ 时,方阻约为 $1.32\text{ }\Omega/\text{sq}$,在电磁屏蔽效能达到 37 dB 以上的同时,其可见光透过率达到 67%,这一特征的金属网栅,可用于对电磁屏蔽效能有较高要求(电磁屏蔽效能 35 dB 以上)的抗干扰试验室、医院核磁共振设备隔离等。



(a)高透过率样件 (b)同时兼顾透光率和 (c)强电磁屏蔽效能样件
电磁屏蔽效能的样件

图 13 金属网栅透明电磁屏蔽玻璃典型案例

5 结论

为了解决金属网栅透明电磁屏蔽玻璃高效和低成本制造的难题,提出一种基于电场驱动喷射沉积微尺度 3D 打印制造金属网栅透明电磁屏蔽玻璃的新方法,以高银含量纳米银浆(质量分数为 80%)为打印材料,使用电场驱动喷射沉积微尺度 3D 打印在玻璃基板上高效低成本制造大面积金属网栅。与现有使用光刻、纳米压印、激光直写等技术制造金属网栅透明电磁屏蔽玻璃相比,提出的方法仅需要一个工艺步骤就能实现大面积高精度金属网栅的制造,而且材料利用率几乎 100%,无需昂贵的设备和模具(掩模),尤其能同时兼顾高可见光透过率和强电磁屏蔽效能。为大尺寸高性能透明电磁屏蔽玻璃的批量化制造提供了一种全新的工业级解决方案。

根据试验优化的结果,金属网栅的线宽选取 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。金属网栅周期 $500\text{ }\mu\text{m}$ 时,可见光透过率为 88%,方阻 $4.93\text{ }\Omega/\text{sq}$,对常用中高频电磁波屏蔽效能大于 26 dB;金属网栅周期 $300\text{ }\mu\text{m}$ 时,可见光透过率为 83%,方阻约 $3.64\text{ }\Omega/\text{sq}$,对常用中高频电磁波屏蔽效能大于 30 dB;金属网栅周期为 $150\text{ }\mu\text{m}$ 时,可见光透过率 67%,方阻约为 $1.32\text{ }\Omega/\text{sq}$,可对常用中高频电磁波屏蔽效能大于 37 dB。

为了进一步提高金属网栅透明电磁屏蔽玻璃的

性能,后续在打印材料、打印工艺优化、烧结等方面还需要开展更为深入的研究,以期进一步减小线宽并同时增大高宽比,提高金属网栅与基材的附着力,降低方阻。

参 考 文 献

- [1] LU Z, MA L, TAN J, et al. Graphene, microscale metallic mesh, and transparent dielectric hybrid structure for excellent transparent electromagnetic interference shielding and absorbing[J]. 2D Materials, 2017, 4(2): 025021.
- [2] 张运强,潘国庆,李福巍. 金属网栅电磁屏蔽薄膜在红外空空导弹上的应用研究[J]. 红外技术, 2010, 32(7): 395-398.
ZHANG Yunqiang, PAN Guoqing, LI Fuwei. Research of metallic mesh in improving electromagnetic shielding of air-to-air missile [J]. Infrared Technology, 2010, 32(7): 395-398.
- [3] KIM D H, KIM Y, KIM J W. Transparent and flexible film for shielding electromagnetic interference[J]. Materials & Design, 2016, 89: 703-707.
- [4] 付秀华,郭贵新,刘禹冰. 基于 PET 基底透明屏蔽膜的制备研究[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 36-40.
FU Xiuhua, GUO Guixin, LIU Yubing. Study on preparation of transparent shielding film based on PET substrate [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 36-40.
- [5] HAN Y, LIU Y, HAN L, et al. High-performance hierarchical graphene/metal-mesh film for optically transparent electromagnetic interference shielding[J]. Carbon, 2017, 115: 34-42.
- [6] JIA L C, YAN D X, LIU X, et al. Highly efficient and reliable transparent electromagnetic interference shielding film[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(14): 11941-11949.
- [7] HECHT D S, HU L, IRVIN G. Emerging transparent electrodes based on thin films of carbon nanotubes, graphene, and metallic nanostructures[J]. Advanced Materials, 2011, 23(13): 1482-1513.
- [8] CHOI H J, PARK B J, EOM J H, et al. Simultaneous realization of electromagnetic interference shielding, hydrophobic qualities, and strong antibacterial activity for transparent electronic devices[J]. Current Applied Physics, 2016, 16(12): 1642-1648.
- [9] CAT Y, BARAN V, AFACAN G, et al. Investigation of electromagnetic interference shielding effectiveness of CZ grown Ge optical windows[J]. Crystal Research and Technology, 2018, 53(8): 1800069.
- [10] HAN Y, ZHONG H, LIU N, et al. In situ surface oxidized copper mesh electrodes for high-performance transparent

- electrical heating and electromagnetic interference shielding[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2018, 4(11): 1800156.
- [11] YAHYAEI H, MOHSENI M. Nanocomposites based EMI shielding materials[J]. *Advanced Materials for Electromagnetic Shielding: Fundamentals, Properties, and Applications*, 2018: 263-288.
- [12] SANNICOLO T, LAGRANGE M, CABOS A, et al. Metallic nanowire - based transparent electrodes for next generation flexible devices: A Review[J]. *Small*, 2016, 12(44): 6052-6075.
- [13] 朱东彬, 楚锐清, 张晓旭, 等. 陶瓷喷墨打印机机理研究进展[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(13): 108-117.
- ZHU Dongbin, CHU Ruiqing, ZHANG Xiaoxu, et al. Progress in mechanism of ceramics inkjet printing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(13): 108-117.
- [14] 兰红波, 李涤尘, 卢秉恒. 微纳尺度 3D 打印[J]. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45(9): 919-940.
- LAN Hongbo, LI Dichen, LU Bingheng. Micro-and nanoscale 3D printing[J]. *Sci. Sin. Tech.*, 2015, 45(9): 919-940.
- [15] QIAN L, LAN H, ZHANG G, et al. A novel microscale 3D printing based on electric-field-driven jet deposition[C]// *American Society of Mechanical Engineers. Manufacturing Engineering Division. ASME 2018 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference*, June 18–22, 2018, Texas A&M University, College Station, Texas. New York: ASME, 2018: V001T01A026.
-
- 作者简介: 周贺飞, 男, 1993 年出生。主要研究方向为 3D 打印和微纳制造。
E-mail: 13061486850@163.com
- 兰红波(通信作者), 男, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为微纳尺度 3D 打印、增材制造、大面积纳米压印、微纳制造、光电子器件制造等。
E-mail: hblan99@126.com